

# 木材径向反复受压应力-应变模型研究<sup>\*</sup>

谢启芳<sup>†</sup>, 张利朋, 王龙, 吴帆帆

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**通过木材小清材试样的单调加载和反复加卸载试验,研究了木材径向全表面受压试样在单调加载和反复加卸载作用下的应力-应变关系.试验结果表明:单调加载应力-应变曲线和反复加卸载骨架曲线在应变小于0.16时基本重合,在应变大于0.16时,两者数值差异逐渐增大,但仍可由同一数学模型进行描述;木材反复卸载、再加载过程中,再加载路径与卸载路径分别由线性和双折线模型表达.综合考虑木材单向横纹受压以及反复加卸载过程中的典型特征,建立了反复荷载作用下木材径向全表面受压应力-应变模型.基于所建模型编写了MATLAB程序,对比分析了模型计算结果与试验结果,两者吻合较好.

**关键词:**木材;径向受压性能;反复荷载;应力-应变模型;MATLAB

**中图分类号:**TU366.2

**文献标志码:**A

## Research on Radial Stress-strain Model of Wood under Repeated Compressive Loading

XIE Qifang<sup>†</sup>, ZHANG Lipeng, WANG Long, WU Fanfan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The radial stress-strain relationship of wood under monotonic and repeated compressive load was studied, according to the tests on the clear wood specimens under monotonic and repeated compressive load. The results show that the monotonic compressive stress-strain curve and the skeleton curve of repeated compressive stress-strain curve are well coincident when the strain is less than 0.16. When the strain is over 0.16, the difference between these two is gradually increased, but they can still be described by the same mathematical model. In the cyclical process, the reloading path and unloading path are expressed by linear and double fold line models, respectively. Based on the comprehensive consideration of the typical characteristics of unidirectional compression and repeated loading and unloading, the stress-strain model of wood under repeated compressive load was established. Based on the established model, a MATLAB program was then written into the MATLAB software. Good consistency was found between the predictions of the model and the test results.

**Key words:** wood; compressive performance in radial direction; cyclic loading; stress-strain model; MATLAB

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-09-23

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51278399), National Natural Science Foundation of China (51278399); 国家重点研发项目(2017YFC0703507), The National Key Research and Development Program of China (2017YFC0703507); 陕西省重大基础研究项目(2016ZDJC-23), Shaanxi Province Natural Science Foundation Project (2016ZDJC-23)

**作者简介:**谢启芳(1978-),男,江西赣州人,西安建筑科技大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: nacy. xie@163. com

木材作为一种重要的土木工程材料,在古建筑以及现代木结构中广泛应用<sup>[1]</sup>.近年来,随着计算机技术的高速发展,有限元分析方法已成为木结构抗震分析的重要手段,然而成功的数值模拟需要良好的木材本构模型.对于以榫卯连接为主的传统木结构,榫卯节点是其抗侧力的主要部位<sup>[2]</sup>.地震作用下榫头、卯口之间处于反复加、卸载应力状态,因此,木材加、卸载下的本构模型对于传统木结构的地震反应分析有着至关重要的作用.

目前有关木材本构模型的研究主要涉及到试验研究和理论模型分析.在试验研究方面,刘一星等<sup>[3]</sup>在 $100\sim 1300\text{ kg/m}^3$ 的密度变异范围内选取了17种阔叶树试材,在典型的6种木材压缩加工条件下(气干 $\cdot 20\text{ }^\circ\text{C}$ ;饱水 $\cdot 20\text{ }^\circ\text{C}$ ;饱水 $\cdot 100\text{ }^\circ\text{C}$ 3种条件与3种约束条件相结合),进行了横纹大变形压缩试验,建立了定量描述木材横纹压缩大变形全应力-应变关系的数学表达式.陶俊林等<sup>[4]</sup>在研究木材静态缓冲特性的基础上,用两个不同的线性方程、三次多项式分别描述了弹性段、弱线性强化段及幂强化阶段,得到了木材静压大变形情况下顺纹和横纹方向的静态压缩本构关系.Reiterer等<sup>[5]</sup>通过对针叶材云杉清材小试件进行不同加载方向的试验分析,建立了云杉木在不同加载方向的应力-应变关系.张红为等<sup>[6]</sup>通过研究杨木在不同温度条件下的径向压缩大变形力学行为,建立了杨木在压缩大变形下的应力-应变关系.孟宪杰等<sup>[7]</sup>对5种木材进行了径向、弦向以及斜向全表面受压试验,结果表明,木材径向和斜向全表面以压缩破坏为主,弦向受压分层理屈曲破坏和压缩破坏2种形式;木材径向和斜向全表面受压应力-应变曲线为三段式,弦向由于木材破坏形式的差异,出现非三段式的应力-应变曲线.

在理论模型研究方面,Oudjene等<sup>[8-9]</sup>建立了能够描述木材横纹受压二次硬化的弹塑性本构理论模型,并基于此编写了算法程序,实现了ABAQUS的数值模拟,为木材本构模型的深入研究提供了借鉴.陈志勇等<sup>[10]</sup>针对木材复杂的各向异性材料特点,建立了能够反映木材正交各向异性弹性、抗拉和抗压强度不等以及受压时发生塑性变形等特性的本构模型,并编制了用户材料子程序用于实现木材本构模型在ABAQUS中的嵌入,为国内木材材性研究领域内的研究者开始探索木材在复杂应力状态下的力学性能及其编程实现提供了丰富的借鉴.Khennane等<sup>[11]</sup>基于不可逆热力学和连续介质力

学,建立了基于损伤能释放率的木材顺纹受拉本构模型.Valipour等<sup>[12]</sup>将木材视为纤维增强复合材料,并对其本构模型进行了研究.谢启芳等<sup>[13]</sup>在分析木材宏、细观构造特征的基础上,将木材等效为并联的受拉木纤维组合,每根纤维等效为弹脆性的受拉微弹簧,基于概率思想建立了木材单向顺纹受拉损伤模型.

可以看出,目前有关木材应力-应变模型的研究主要是基于木材单调加载试验得出的,将其直接应用于结构地震反应分析中的适用性有待进一步考证.因此,应逐步开展木材在反复加、卸载作用下受力变形特征的相关研究工作.

基于上述分析,本文通过木材径向反复加、卸载试验,建立了木材在单调加载以及反复加卸载情况下的径向受压应力-应变模型.

## 1 木材横纹径向全表面受压试验

### 1.1 试件设计

试件采用东北落叶松材,其微观层次的木纤维规律性排列构造特征,导致了其宏观层次具有明显方向性的各向异性特性,实际中往往将其简化为正交各向异性,有着3个对称轴:平行于木材生长轴的顺纹方向( $L$ 向);垂直于生长轴并且与生长轮垂直的横纹径向( $R$ 向);垂直于生长轴并与生长轮相切的横纹弦向( $T$ 向),如图1(a)所示.

为了研究木材径向全表面受压的力学性能,根据GB 1929-1991《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》<sup>[14]</sup>和GB 1939-1991《木材横纹抗压试验方法》<sup>[15]</sup>的规定,木材试件尺寸取 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ .落叶松材锯解后的形态,分别见图1(b)和图1(c).

按照GB 1933-1991《木材密度测定方法》<sup>[16]</sup>测得木材密度为 $5.56\text{ kg/m}^3$ .按照GB 1933-1991《木材含水率测定方法》<sup>[17]</sup>测得含水率为15%.

木材试样共14个,分为两组.其中7个试样进行单调加载试验、7个试样进行反复加卸载试验.

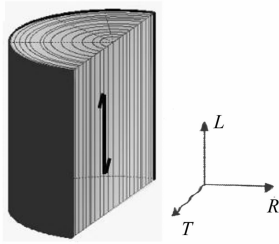
### 1.2 加载与量测方案

试验在DNS300型电子万能试验机上进行.轴向荷载采用量程为30 kN的力传感器量测,轴向变形通过量程为 $\pm 25\text{ mm}$ 、精度为 $\pm 5\text{ }\mu\text{e}$ 的高灵敏度位移传感器量测(将所测变形数据与标距30 mm之比近似作为试件的应变值),数据通过TDS-602自动数据采集仪采集.试验前,将力传感器放在试验机

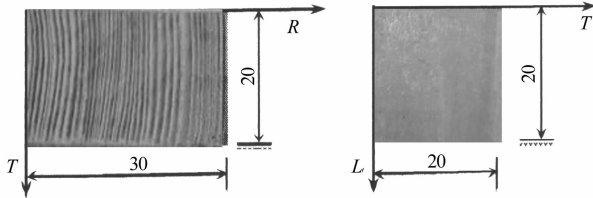
的下垫板上,并调整力传感器使其与试验机下垫板对中;将位移传感器与磁力表座连接好并将位移计置于横梁下方,并保证其垂直性,使得位移计测针能够准确地量测横梁的位移. 试验装置如图 2 所示.

将试样放置于力传感器和试验机上垫板之间,并保证试样的  $L-T$  面与试验机的上垫板和力传感器接触以承压.

采用位移加载方式对试件进行加载,加载制度见图 3,单调加载试验则直接加载至试件破坏. 单调加载和反复加卸载试验的加载速率均为  $0.5 \text{ mm/min}$ .



(a) 木材的正交各向异性



(b) 试件  $R-T$  平面的形态

(c) 试件  $L-T$  平面的形态

图 1 木材的方向以及径向全表面受压试件锯解尺寸示意图

Fig. 1 Sampling position of wood radial compression specimen

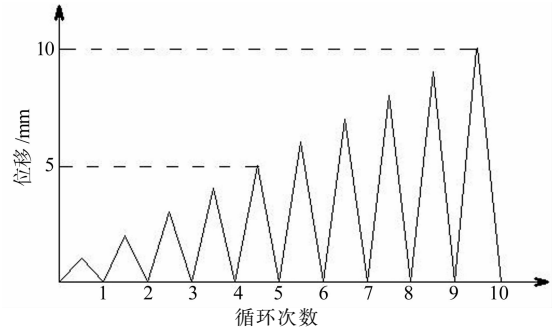


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading scheme

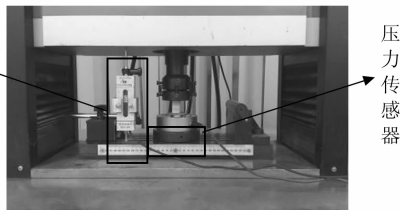


图 2 试验装置

Fig. 2 Test setup

## 2 试验结果分析

试验结果汇总于表 1. 表 1 中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_n$ 、 $\sigma_u$  分别为屈服应力、由弱线性强化变为二次强化时的临界应力以及总应变达到 30% 时的应力;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_n$ 、 $\epsilon_u$  分别为与屈服应力、由弱线性强化变为二次强化时的临界应力以及总应变达到 30% 时的应力所对应的应变值;  $E_1$  和  $E_q$  分别为线弹性段的弹性模量和弱线性强化段的切线模量.

表 1 试验结果  
Tab. 1 Test results

加载方式	试件	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_n$ /MPa	$\sigma_u$ /MPa	$\epsilon_1$ /%	$\epsilon_n$ /%	$\epsilon_u$ /%	$E_1$ /MPa	$E_q$ /MPa
单调 加载 试验	D-1	4.10	6.82	20.87	2.41	19.13	29.9	170.09	15.75
	D-2	3.61	6.27	21.17	2.13	19.01	30.0	177.06	15.49
	D-3	3.51	5.81	20.67	2.21	17.94	30.3	158.92	14.21
	D-4	3.72	6.03	21.08	2.25	18.56	30.1	165.35	13.84
	D-5	4.01	6.60	21.00	2.26	19.20	30.0	174.36	15.16
	D-6	3.66	6.00	20.91	2.10	18.96	29.9	169.19	13.90
	平均值	3.77	6.26	20.39	2.23	18.80	30.0	169.16	14.73
变异系数	0.23	0.39	0.29	0.11	0.48	0.15	6.48	0.84	
反复 加卸 载试验	F-1	3.81	6.13	17.21	2.0	20.8	30.0	174.29	13.25
	F-2	3.63	5.85	17.06	2.3	20.2	29.3	157.83	12.44
	F-3	3.66	6.02	17.35	2.1	19.7	29.0	190.38	13.41
	F-4	3.27	5.81	16.86	1.9	18.9	30.1	172.11	14.94
	F-5	3.92	6.24	17.36	2.6	21.2	31.5	150.77	12.47
	F-6	3.87	6.22	16.98	2.3	20.5	30.6	168.26	12.91
	平均值	3.69	6.05	17.14	2.20	20.40	30.10	168.90	13.24
变异系数	0.24	0.18	0.20	0.20	0.56	0.90	13.80	0.92	

### 2.1 试件破坏形态

试件径向全表面受压全过程可以分为明显的3个阶段:弹性变形阶段、塑性阶段和压缩致密化阶段.在弹性变形阶段,试件并未发生明显的变形或者破坏;在塑性阶段,木材由于早材区被压缩发生了轻微变形;进入压缩致密化阶段后,试件晚材区的细胞壁也逐渐被压溃.试件最终的破坏形态如图4所示.

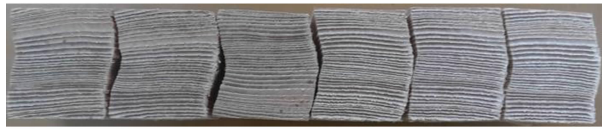


图4 木材径向全表面受压破坏形态  
Fig.4 Failure modes of wood specimens

### 2.2 应力-应变曲线分析

图5为木材径向全表面受压试件单调加载应力-应变试验曲线(归一化后)的对比.可以看出,应力-应变曲线在整个受力过程中的变形趋势基本一致;试验数据在弹性阶段和弱线性强化段的离散性较小,在二次强化段的离散性偏大.

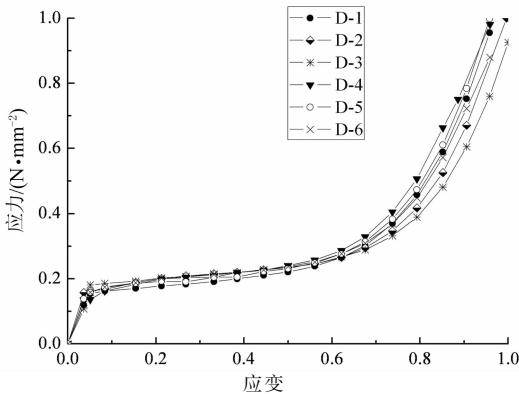
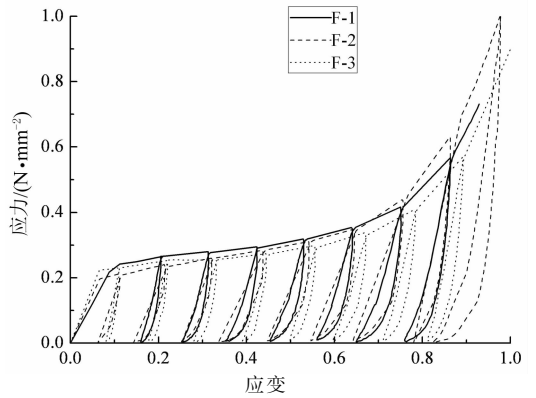


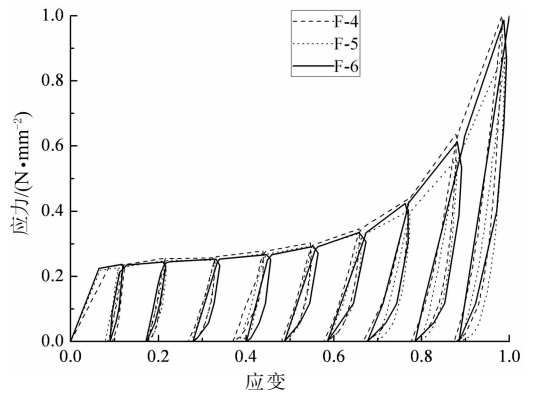
图5 木材径向全表面单调加载应力-应变曲线  
Fig.5 Stress strain curves of wood under monotonic compression

图6为木材径向全表面受压试件反复加卸载应力-应变试验曲线的对比(归一化后).可以看出,反复加卸载过程中,试件产生了不可恢复变形,并且,随着荷载的增加,不可恢复程度显著增大.结果表明,木材径向全表面受压全过程为弹塑性过程.

图7为木材径向全表面受压试件单调加载应力-应变试验曲线与反复加卸载应力-应变试验曲线及其骨架曲线的对比情况.可以看出,反复加卸载骨架曲线能够直观表现出反复加卸载与单调荷载作用下木材响应的区别:幂强化阶段,单调加载应力-应变曲线的强化程度要明显高于反复加卸载骨架曲线,当总应变达到30%时,前者的应力水平已比后者高出约23%.



(a) 试件 F-1~F-3



(b) 试件 F-4~F-6

图6 木材径向全表面反复压缩应力-应变曲线  
Fig.6 Stress strain curves of wood under repeated compression

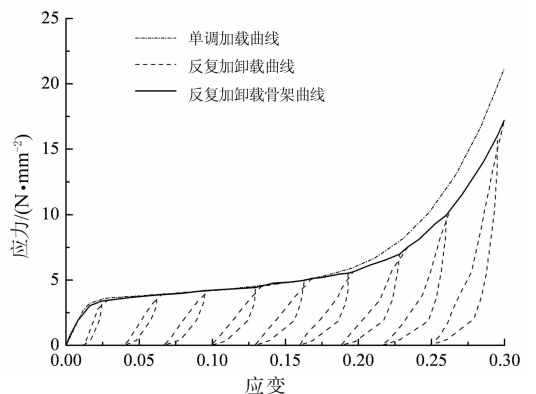


图7 木材径向全表面单调压缩与反复压缩试验曲线  
Fig.7 The test curves of wood specimen under monotonic and repeated compression

图7中木材径向全表面反复受压应力-应变曲线表明,在加载和卸载过程中,应力和应变服从不同的规律,这是木材进入塑性阶段后的一个重要特点.卸载曲线经历了从近似线性到非线性的变化过程,当加载应力较小时,卸载应力路径接近直线;当加载应力较大时,卸载路径变为非线性,并且随着卸载点应变的增大,卸载曲线非线性程度逐渐增大.单调加载应力-应变曲线和反复加卸载骨架曲线在应变小

于 0.16 时基本重合,在应变大于 0.16 时,两者数值差异逐渐增大.图 7 所示的木材径向反复加卸载应力-应变曲线最显著的特点在于其加卸载刚度的变化规律:在弱线性强化阶段,其卸载刚度和再加载刚度均呈现逐渐退化的规律而在二次强化阶段却是逐渐强化的.这主要是因为木材在幂强化阶段发生的既有不可恢复变形较大,继续发生压缩变形的难度逐渐增加.

### 3 木材径向全表面受压应力-应变关系模型

#### 3.1 单向受压应力-应变关系模型

木材径向全表面单轴受压应力-应变曲线采用简化后的三段式模型:线弹性段、弱线性强化段和幂强化段,如图 8 所示.

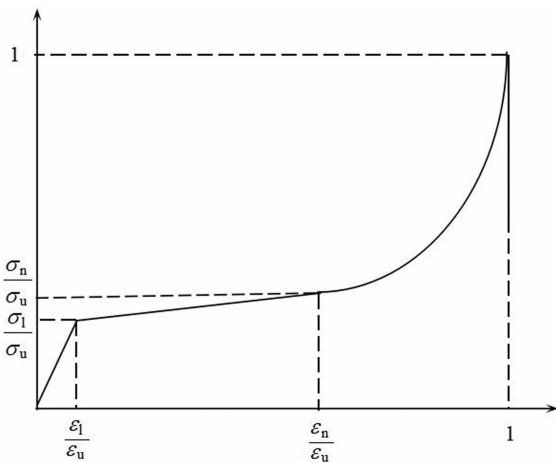


图 8 简化的木材径向全表面单轴压缩模型  
Fig. 8 The simplified model of wood under monotonic compression

具体数学描述为:

$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = \begin{cases} \bar{E}_e \frac{\epsilon}{\epsilon_u}, & 0 < \epsilon \leq \epsilon_1 \\ \frac{\sigma_1}{\sigma_u} + \frac{\bar{E}_p}{\epsilon_u \sigma_u} (\epsilon - \epsilon_1), & \epsilon_1 < \epsilon \leq \epsilon_n \\ \frac{\sigma_n}{\sigma_u} + b \left( \frac{\epsilon - \epsilon_n}{\epsilon_u} \right)^c, & \epsilon_n < \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_u$  和  $\epsilon_u$  分别为最大荷载对应的应力值和应变值;  $\sigma_1$  和  $\sigma_n$  分别为屈服点应力和弱线性强化段转为二次强化段时的临界应力值;  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_n$  分别为屈服点应力和弱线性强化段转为二次强化段时的临界应力所对应的应变值;  $\bar{E}_e$  和  $\bar{E}_p$  分别为弹性段和弱线性强化阶段的无量纲化弹性模量,其值分别为 3.76 和 0.17;  $b$  和  $c$  分别为二次强化段的曲线参数.根据单

调加载试验结果,模型中的各个材料常数值以及曲线参数值分别示于表 1 和表 2 中.

#### 3.2 反复加卸载骨架曲线模型

根据图 7 所示试验结果,反复加卸载骨架曲线同样可划分为与单调加载应力-应变曲线相同的 3 个阶段,并且两者在线弹性段和弱线性强化段几乎重合.反复加卸载骨架曲线与单调加载应力-应变曲线相比,最为显著的区别在于前者在二次强化段的强化程度偏弱,这可能是由于材料内部应力的反复加卸历史造成的材料损伤引起了强度的损失.因此,为了能够使得所建模型较好地反映反复加卸载骨架曲线与单调加载应力-应变曲线之间的区别,只需要分别给出两者在幂强化段不同的强化反应即可.而能够最直观地反映这种区别的便是幂强化形状参数,因此,本文给出了反复加卸载骨架曲线与单调加载应力-应变曲线两者在二次强化段的参数值,如表 2 所示.

表 2 二次强化曲线参数值

Tab. 2 Parameter values of the secondary hardening curve

项目	$b$	$c$
单调加载试验	15 005.9	5.879
反复加卸载试验	16 006.8	5.696

反复加卸载骨架曲线与单调加载应力-应变曲线在二次强化段的强化参数之间的量化关系分别由式(2)和(3)给出:

$$b_g = 1.067b \quad (2)$$

$$c_g = 0.969c \quad (3)$$

式中:  $b_g$  和  $c_g$  分别为木材反复加卸载骨架曲线在二次强化段的强化参数.

式(2)和式(3)给出了木材径向全表面受压反复加卸载骨架曲线与单调加载曲线之间的转化关系,在没有反复加卸载试验数据时,可按此转化关系确定反复加卸载骨架曲线的变形规律.

#### 3.3 反复加卸载应力-应变模型

根据图 7 所示试验结果,可对反复加卸载应力-应变曲线作图 9 所示的简化.

假设反复加卸载骨架曲线上的卸载控制点坐标为  $(\epsilon_s, \sigma_s)$ ; 双折线卸载时的转折点坐标为  $(\epsilon_0, \sigma_0)$ , 其中,  $\sigma_0$  为根据试验结果确定的常应力值,其取值见式(4):

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_u} = \begin{cases} 0.085, & 0 < \epsilon/\epsilon_u \leq 0.55 \\ 0.105, & 0.55 < \epsilon/\epsilon_u \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

假设  $E_{11}$  和  $E_{12}$  分别为卸载第 1 段和第 2 段刚度,其结果可根据归一化的反复加卸载曲线得到,分别见式(5)和式(6):

$$E_{11} = (\sigma_s - \sigma_0) / (\epsilon_s - \epsilon_0) \tag{5}$$

$$E_{12} = \begin{cases} 4.58 + 7.9 \exp\left(-\frac{\sigma_s}{0.12\sigma_u}\right), & 0 < \epsilon/\epsilon_u \leq 0.26 \\ 53.45\sigma_s/\sigma_u - 6.572, & 0.26 < \epsilon/\epsilon_u \leq 1 \end{cases} \tag{6}$$

假设  $E_u$  为线性再加载刚度, 根据模型公式求得残余塑性应变点  $(\epsilon_{res}, 0)$  后, 即可求得线性再加载刚度  $E_u$ , 见式(7).

$$E_u = \sigma_s / (\epsilon_s - \epsilon_{res}) \tag{7}$$

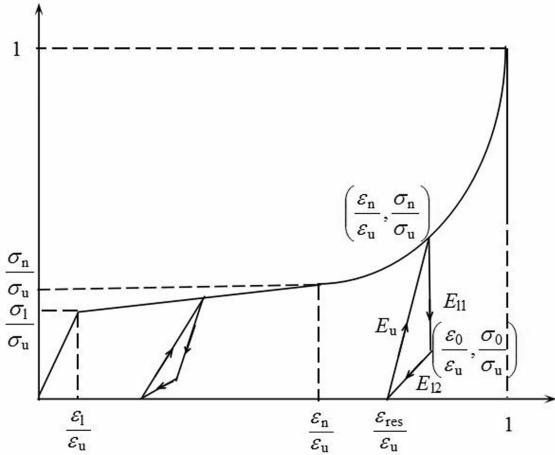


图9 简化的木材径向全表面反复压缩模型  
Fig. 9 The simplified model of wood under repeated compression

### 4 模型分析与试验分析对比

基于 MATLAB 软件编写木材径向全表面受压单调加载与反复加卸载应力-应变模型的程序, 并将模型的计算结果分别与编号为 D-7 和 F-7 的试件的试验结果进行对比, 对比情况见图 10 和图 11.

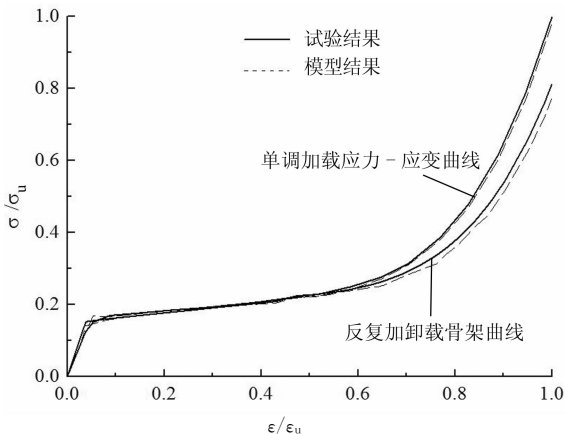


图10 单调加载应力-应变曲线和反复加卸载骨架曲线的模型结果与试验结果对比  
Fig. 10 The comparison between test results and model results of monotonic compressive stress strain curve and skeleton curve of repeated loading and unloading

根据所建模型与试验分析的结果可以看出, 两者极为吻合. 根据图 11, 反复加卸载的模型分析结果与试验曲线的再加载部分在二次强化阶段存在微小偏差, 这是由于在二次强化阶段, 实际再加载路径是非线性的, 而在理论模型中为统一化和简单化起见作出了再加载路径线性化的假定.

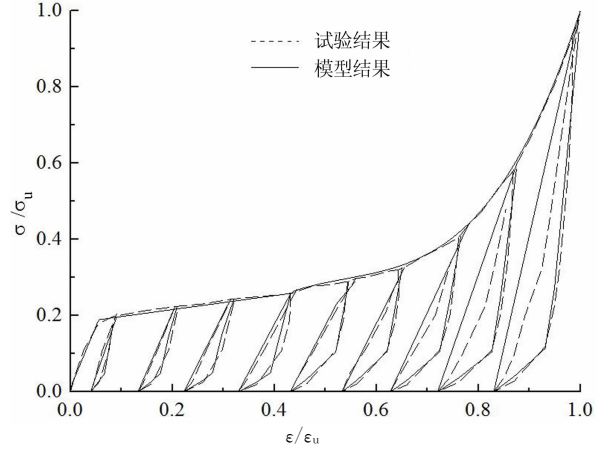


图11 反复加卸载应力-应变模型结果与试验结果的比较  
Fig. 11 The comparison between test results and model results of compressive stress strain relation of repeated loading and unloading

### 5 结论

1) 木材径向全表面受压单调应力-应变曲线和反复加卸载骨架曲线均呈现出明显的三阶段变化: 弹性阶段、弱线性强化阶段和二次强化阶段, 并且两者在前两个阶段基本重合, 而在二次强化阶段, 前者的强化程度比后者大.

2) 木材径向全表面受压过程中, 卸载刚度和再加载刚度在弱线性强化段均是逐渐退化的, 进入二次强化阶段后, 由于材料逐渐被压缩致密, 两者又逐渐增大.

3) 木材径向全表面受压反复加卸载骨架模型可以由单调加载应力-应变模型转化而来. 只需要在单调加载应力-应变模型的基础上, 将二次强化段的参数  $b$  和  $c$  分别乘以系数 1.067 和 0.969 即可.

4) 通过由线弹性阶段、弱线性强化阶段和二次强化阶段构成的三段式模型对木材径向全表面受压单调加载曲线和反复加卸载骨架曲线有较好的模拟效果.

### 参考文献

[1] 张晋, 王斌, 宗钟凌, 等. 木结构榫卯节点耐火极限试验研究

- [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 118—123.  
ZHANG J, WANG B, ZONG Z L, *et al.* Experimental study on fire endurance of mortise-tenon joint in timber structures[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 118—123. (In Chinese)
- [2] 潘毅, 李玲娇, 王慧琴, 等. 木结构古建筑震后破坏状态评估方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 132—142.  
PAN Y, LI L J, WANG H Q, *et al.* Reseach on evaluation method for the post-earthquake damage state of ancient wooden buildings[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 132—142. (In Chinese)
- [3] 刘一星, 则元京. 木材横纹压缩大变形应力-应变关系的定量表征[J]. 林业科学, 1995, 5(31): 436—441.  
LIU Y X, ZE Y J. Quantitative expression on the large transverse compressive deformation relationships between stress and strain of wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 5(31): 436—441. (In Chinese)
- [4] 陶俊林, 蒋平, 余作生. 木材静压大变形本构关系研究[J]. 力学与实践, 2000, 22(5): 25—27.  
TAO J L, JIANG P, YU Z S. On the static constitutive relation of wood with large deformation[J]. Mechanics in Engineering, 2000, 22(5): 25—27. (In Chinese)
- [5] REITERER A, STANZL-TSCHEGG S E. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(12): 705—715.
- [6] 张红为, 胡兵, 邵卓平. 杨木压缩应力-应变关系研究[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(4): 665—668.  
ZHANG H W, HU B, SHAO Z P. Stress strain relationship with compression of poplar[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2010, 37(4): 665—668. (In Chinese)
- [7] 孟宪杰, 陈金勇, 师希望, 等. 木材横纹全表面受压性能试验研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(1): 62—65.  
MENG X J, CHEN J Y, SHI X W, *et al.* An experimental study of the wood performance under whole section compression in the transverse direction[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(1): 62—65. (In Chinese)
- [8] OUDJENE M, KHELIFA M. Elasto-plastic constitutive law for wood under compressive loadings [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(11): 3359—3366.
- [9] OUDJENE M, KHELIFA M. Finite element modeling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4081—4087.
- [10] 陈志勇, 潘景龙, 祝恩淳. 复杂应力状态下木材力学性能的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 629—640.  
CHEN Z Y, PAN J L, ZHU E C. Numerical simulation of mechanical behaviour of wood under complex stress [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(4): 629—640. (In Chinese)
- [11] KHENNANE A, KHELIFA M, BLERON L, *et al.* Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures[J]. Mechanics of Materials, 2014, 68(1): 228—236.
- [12] VALIPOUR H, KHORSANDNIA N, CREWS K, *et al.* A simple strategy for constitutive modeling of timber[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53(4): 138—148.
- [13] 谢启芳, 张利朋, 王龙, 等. 东北落叶松材单向顺纹受拉损伤模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 109—116.  
XIE Q F, ZHANG L P, WANG L, *et al.* Damage evolution model for northeast larch wood under parallel-to-grain tension load[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 109—116. (In Chinese)
- [14] 中华人民共和国建设部. GB 1929—1991 木材物理力学试材锯解及试样截取方法[S]. 北京: 建筑工业出版社, 1991.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 1929—1991 Physical mechanics test and method of sample cutting of wood[S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 1991. (In Chinese)
- [15] 中华人民共和国建设部. GB 1939—1991 木材横纹抗压试验方法[S]. 北京: 建筑工业出版社, 1991.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 1939—1991 Method of testing in compressive strength perpendicular to grain of wood[S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 1991. (In Chinese)
- [16] 中华人民共和国建设部. GB 1933—1991 木材密度测定方法[S]. 北京: 建筑工业出版社, 1991.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 1933—1991 Method of determination of wood density[S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 1991. (In Chinese)
- [17] 中华人民共和国建设部. GB 1933—1991 木材含水率测定方法[S]. 北京: 建筑工业出版社, 1991.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 1933—1991 Method of determination of moisture content of wood[S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 1991. (In Chinese)